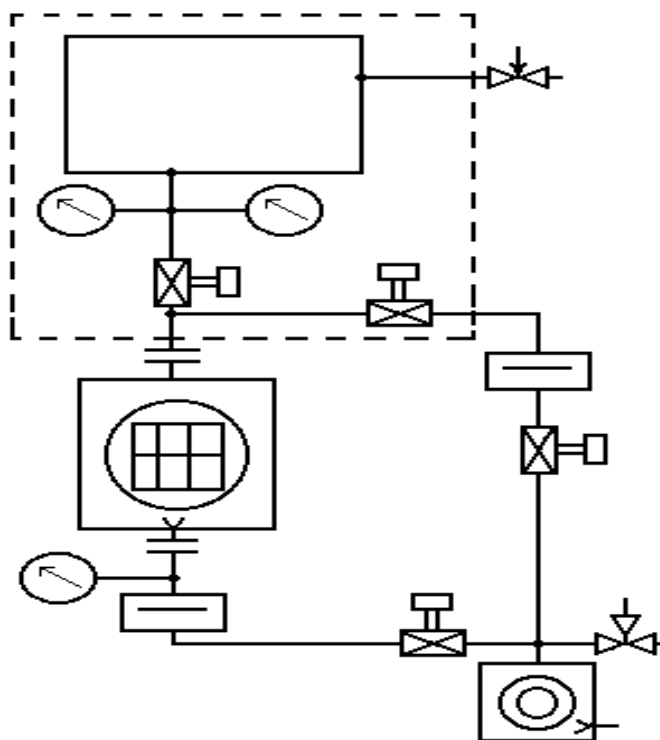


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**Є.В. ШЕПІЛКО**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ**  
**З КУРСУ “ ВАКУУМНА ТЕХНІКА”**

для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання напряму підготовки  
6.050701 “Електротехніка та електротехнології” (0906 “Електротехніка”)  
спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”



**ХАРКІВ - ХНАМГ – 2010**

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з курсу “Вакуумна техніка”( для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” (0906 “Електротехніка”) спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”. / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Є.В. Шепілко – Х.: ХНАМГ, 2010. - 36 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. В.А.Буц

Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла,  
протокол № 1 від 1.09. 2009 р.

## ПЕРЕДМОВА

Ці методичні вказівки містять відомості з оформлення розрахунково-графічної роботи, опис методів розрахунку вакуумних систем, розрахунку часу відкачки і засобів вибору вакуумних насосів, розрахунку вакуумних камер і форвакуумного балона і т. ін.

У додатку 1 наведено довідкові дані для стандартних вакуумних насосів і агрегатів й дані щодо характеристик якостей матеріалів, які застосовують у вакуумній техніці й необхідні при виконанні розрахунків, а в додатку 2 – позначення елементів вакуумних систем.

Розрахунково-графічну роботу студенти виконують відповідно до програми курсу “Вакуумна техніка”. Починаючи її виконання, студенти повинні уважно й глибоко розглянути теоретичні питання завдання згідно з вибраною темою, а також ознайомитися з наявною літературою з “Вакуумної техніки”. Використання ЕОМ для розрахунків розглядається як вміння студентів працювати з програмними засобами проведення розрахунків.

Виконання розрахунково-графічної роботи розширює та поглиблює теоретичні знання студентів, закріплює практичний досвід розрахунку вакуумних систем, що можуть знайти практичне застосування.

При виконанні розрахунково-графічної роботи студенти набувають досвід самостійного вирішення завдань вакуумної техніки і вміння користуватись довідковою літературою.

Мета цих методичних вказівок - полегшити роботу студентів над розрахунково-графічною роботою з вакуумної техніки.

Завдання до розрахунково-графічної роботи складається з теми роботи, початкових даних для її виконання, переліку питань, які необхідно розробити, необхідних креслень та переліку використаної літератури.

Розрахунково-графічна робота складається з графічної частини — відповідні креслення й розрахункової-пояснювальної записки, що повинна відповідати графічній частині роботи.

Виконана розрахунково-графічна робота має показати, що студент володіє знаннями елементів вакуумної техніки та процесів, що виникають під час відкачки, а також вміння виконувати розрахунки при розробці необхідної вакуумної системи і вміння правильно оформляти результати зробленої роботи. Виконану розрахунково-графічну роботу подають викладачеві для перевірки й оцінки. Студент, який правильно її виконав, допускається до екзамену.

При оцінці розрахунково-графічної роботи враховують її зміст, обґрунтованість викладеного матеріалу і розрахунків, застосування оригінальних рішень та розробок, використання ЕОМ, зовнішнє оформлення. рівень доробок.

## **I. ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО – ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ**

Розрахунково-пояснювальна записка повинна починатися з титульного аркуша (див. **Додаток 3**); другий аркуш—завдання до роботи, де зазначають найменування розділів і номер аркуша, з якого вони починаються; третій аркуш — зміст записки, а далі сама записка, що оформляється відповідно до ДОСТ 2.105-79 на письмовому папері формату ІІ (297×210мм) на одній стороні аркуша.

Текст, написаний чорнилами, не повинен виступати за рамки: 25 мм з боку підшивки від краю аркуша, 20 мм зверху і знизу і 10 мм праворуч від края аркуша. Кожний розділ записки починається з нового аркуша при наскрізній нумерації тексту. Схеми й рисунки для пояснення розрахунків виконують на аркушах формату А4 або А3 (297×420мм). Усі позначення одиниць фізичних величин необхідно подавати в системі SU. Літерні позначення величин, що входять до формул, необхідно розшифровувати поясненнями. При зведенні результатів розрахунків у таблиці останні оформляють відповідно до ДОСТ 2.106-68, ДОСТ 2.108-68. Список використаної літератури складають згідно з ДОСТ 7.1-76. При посиланні на джерела інформації необхідно вказувати у квадратних дужках порядковий номер літератури зі списку, який наводиться у кінці записки. Матеріал записки потрібно викладати у логічній послідовності і по можливості стисло (але не на шкоду змісту) з тим, щоб у цілому обсяг не перевершував 15-20 сторінок рукописного тексту. Всі аркуші потрібно зброшурувати і вкласти у папку.

Графічну частину роботи виконують відповідно до ЄСКД згідно з ДОСТ 2.301-68, ДОСТ 2.307-68 (ІСО 5457) на аркуші формату (А3) (297×420мм) м'яким чорним олівцем.

Текст і надписи на кресленнях повинні бути стислими і виконуваними креслярським шрифтом. Масштаб та ступінь деталізації вибираються з урахуванням умов доцільності. У нижньому правому куті розміщують штамп, графі якого заповнюють відповідно до ДОСТ 2.106-68. Деталі і блоки, що використовуються у роботі, перераховуються у специфікації, що виконується на кресленні, або наводять в тексті записки.

## **2. ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКОВО – ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ**

Початкові дані до розрахунково-графічної роботи — це завдання, в якому викладач відмічає призначення та об'єм вакуумної камери, робочий інтервал тиску газу, характеристики технологічного процесу, проміжок часу, за який необхідно досягти заданого тиску, питання, що потребують розрахунку.

## **3. РОЗРАХУНОК ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ**

Розрахунок вакуумної системи складається з двох етапів: **проектного і повірочного**.

**Проектний розрахунок** треба виконувати у такій послідовності: визначити типи насосів, що забезпечать відкачку вакуумної камери до заданого у проекті тиску; по заданому або розрахованому самотійно потоку газів вибрати конкретний насос остаточної відкачки; згідно з параметрами насоса остаточної відкачки вибрати насоси допоміжного і попереднього розрідження; скласти принципову схему вакуумної системи, визначити орієнтовні розміри трубопроводів і необхідних вентилів, вибрати засоби вимірювання та контролю тиску; за заданою тривалістю попередньої відкачки вибрати насос попереднього розрідження.

**Результатом проектного розрахунку** має бути принципова схема вакуумної установки, що забезпечує умови виконання завдання, типи насосів та вентилів і орієнтовні розміри трубопроводів.

**Повірочний розрахунок** виконують у такій послідовності: за вибраними конструктивними розмірами вакуумної системи розрахувати величину ефективної швидкості відкачки системи; враховуючи газонатікання, розрахувати час, за який досягається заданий тиск у вакуумній камері; якщо потоки газовиділення та натікання не задані, потрібно попередньо їх розрахувати або оцінити; розрахувати тривалість попередньої відкачки з урахуванням залишкового тиску насоса попереднього розрідження з урахуванням зміни режимів протікання газів.

## **4. ТИПОВІ ВАКУУМНІ СХЕМИ**

Залежно від способу досягнення розрідження і призначення вакуумних систем можна підрозділити їх на системи “масляної” і “безмасляної” відкачки, а також на прогрівані й не прогрівані.

Вакуумна система для досягнення високого вакуума має мати мале власне газовиділення і натікання через течі, вакуумна камера — захист від проникнення пари робочої рідини насоса.

### **4.1. Традиційна високовакуумна система**

Традиційна високовакуумна система із застосуванням пароструминних і механічних насосів показана на рис.1. Високий вакуум у вакуумній камері 4 досягається за допомогою пароструминних насосів 1 і 2; насос 1 вибирають з граничним тиском менше  $10^{-4}$  Па, з малою швидкодією і з випускним тиском 2...3 Па; допоміжний бустерний (підвищує ефективність роботи насоса 1 під час великих газових навантажень) насос 2 працює при вхідному тиску 10 Па і тиску більше 100 Па на вихідному патрубку. Попереднє розрідження здійснюється механічним обертовим насосом 12. Для зменшення забруднення високовакуумних насосів парою масла насоса попереднього розрідження використовується охолоджуваній водою уловлювач пари 11, а для зменшення кількості пари робочої рідини пароструминних насосів у вакуумній камері -- уловлювач 5, що охолоджується рідким азотом. Засувки 3, 10 відокремлюють

камеру і дозволяють дроселювати (дозовано регулювати) потік повітря, що надходить до форвакуумного насоса 2. Засувка 8 дозволяє сполучати обертовий насос 12 з атмосферою при його зупинці.

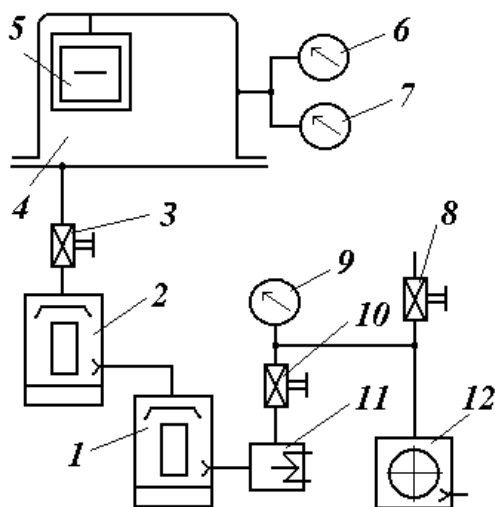


Рис. 1.

Перевага цієї вакуумної системи — висока надійність і не дефіцитність комплектуючих елементів. Така схема дозволяє досягнути вакууму порядку  $10^{-4}$  Па.

До недоліків слід віднести малу швидкість відкачки і значні витрати енергії.

#### 4.2. Вакуумна система з обхідною лінією

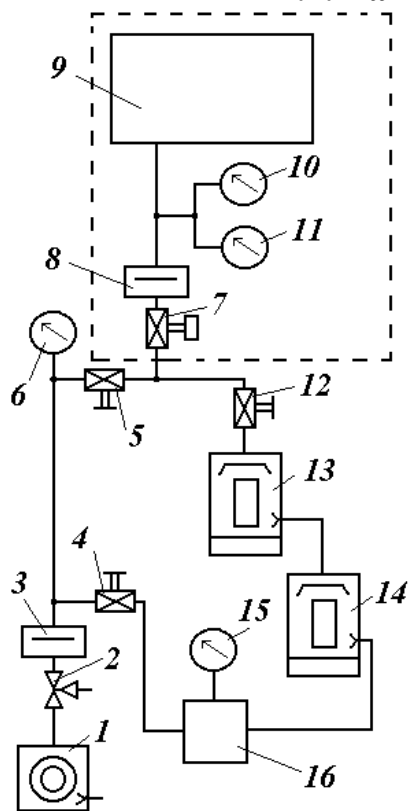


Рис. 2.

Вакуумна система з обхідною лінією попередньої відкачки (рис.2) застосовується з метою зменшення непродуктивних втрат часу на охолодження і нагрівання пароструминних насосів і для прискорення досягнення у системі необхідного попереднього розрідження. Розглядувана вакуумна система відрізняється від попередньої наявністю форвакуумного балона 16, обхідної лінії передньої відкачки з клапаном 5 (крім того, є клапани 7, 2) і можливістю прогріву нагрівачем — штрихова лінія — вакуумної камери 9 і її елементів. Прогрівання до температури  $400...450^{\circ}\text{C}$  дозволяє знизити граничний тиск і зменшити забруднення вакуумної камери парою робочої рідини. Коли засувки 2, 4, 12 закриті, тільки тоді вакуумну камеру можна відкрити, а дифузійний 14 і бустерний 13 насоси будуть працювати від форвакуумного балона 16, тиск в якому контролюється манометричним

перетворювачем 15 (6, 10, 11 -- також манометричні перетворювачі). Після герметизації системи вона відкачується форвакуумним насосом 1 через засувку 5 і після досягнення потрібного розрідження з'єднується за допомогою засувки 4, 12 з працюючими високовакуумними насосами.

До переваг цієї системи слід віднести низький граничний тиск  $-10^{-8}$  Па і підвищену швидкість відкачки як по лінії попереднього розрідження, так і в умовах великих газових навантажень.

Недоліком є мала надійність захисту (уловлювачами 3, 8) від забруднення вакуумної камери парою робочої рідини.

#### 4.3. Вакуумна система комбінованої відкачки

Вакуумна система комбінованої відкачки (рис.3) дозволяє отримати за допомогою пароструминного й іонно-сорбційного насосів розрідження  $10^{-6} \dots 10^{-9}$  Па. Високовакуумна частина разом з насосом 4 прогрівається нагрівачем 3 до температури 400-450° С протягом 4-8 годин. Гази, що при

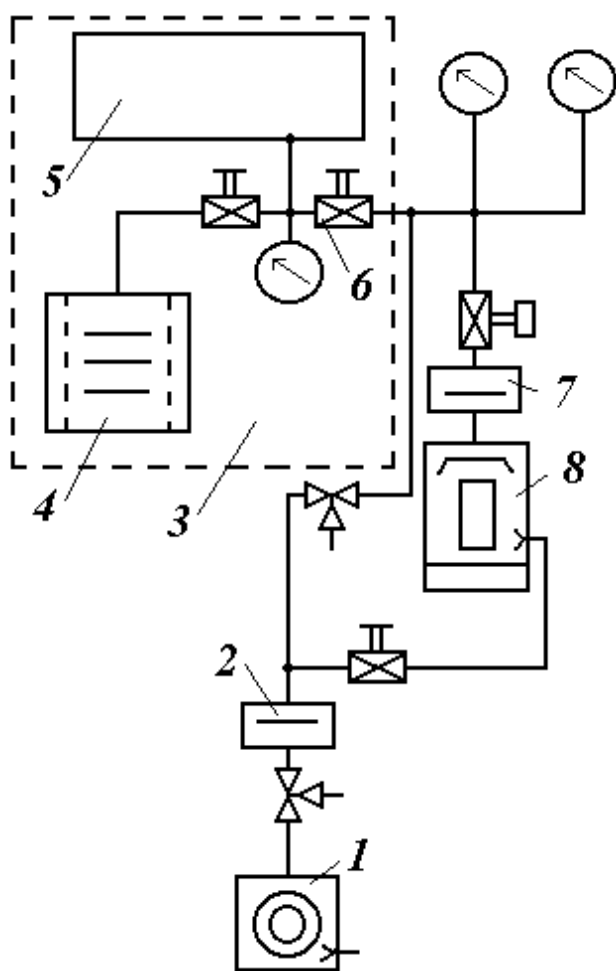


Рис.3.

цьому виділяються, відкачуються послідовно ввімкненими дифузійним 8 та механічним 1 насосами. Коли тиск у камері досягне  $10^{-3} - 10^{-9}$  Па, магістраль дифузійного насоса перекривається вентилем 6 і вмикається іонно-сорбційний насос 1. Якщо використовувати електророзрядний насос, що має порівняно низький тиск запуску ( $1 \dots 10^{-1}$ ) Па, то можна обмежитись одним насосом попередньої відкачки. Уловлювачі 2, 7 потрібні для зменшення забруднення вакуумної частини парою робочої рідини насосів.

Недоліком є можливість забруднення вакуумної камери парою робочої рідини дифузійного насоса, що призводить до погіршення параметрів іонно-сорбційного насоса з причини забруднення електродів продуктами крекінгу (розщеплення на легкі складові) органічних сполучень у розрядному проміжку насоса.

#### 4.4. Вакуумна система “безмасляної” відкачки

Вакуумна система “безмасляної” відкачки дозволяє одержувати високий і надвисокий вакуум при виключенні можливості забруднення вакуумної камери

парою робочої рідини і реалізується як за допомогою механічних насосів (двороторних, молекулярних й турбомолекулярних), що не потребують змащування, так і адсорбційних та іонно-сорбційних. На рис. 4 показана одна з таких систем.

Попереднє розрідження для одержання пускового тиску менше 1 Па здійснюється двоступеневим обертovým насосом 1 як по лінії обхідної відкачки

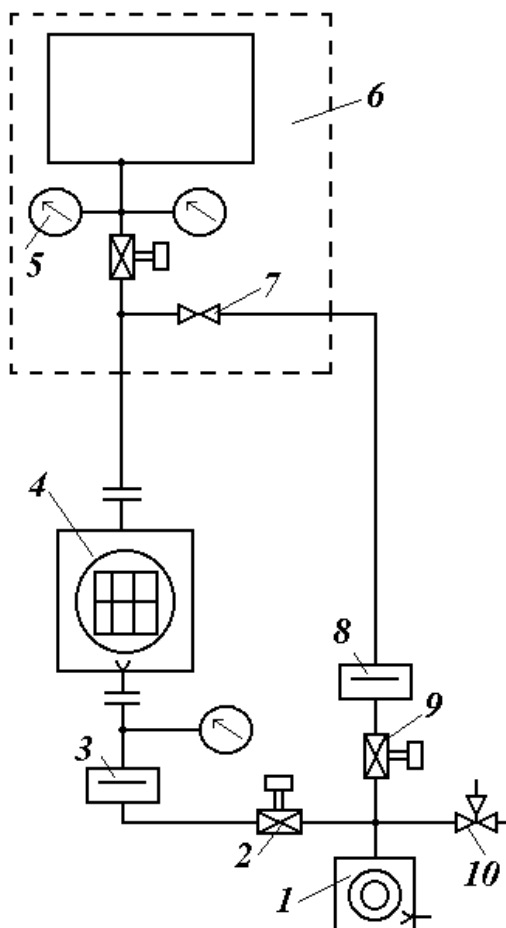


Рис. 4.

через вентилі 7, 9, так і через засувку 2, якою підключається магістраль високо вакуумного турбомолекулярного насоса 4 (вентиль 10 - для з'єднання з атмосферою). Для запобігання проникнення пари масла у високовакуумну частину використовують адсорбційний і механічний уловлювачі 3, 8. У високовакуумній частині уловлювач взагалі не використовується, оскільки її функції виконує турбомолекулярний насос, після запуску якого відокремлюється лінія обхідної відкачки вентилем 7, що прогривається разом з іншими елементами камери нагрівачем 6 до температури 400°C.

Турбомолекулярний насос на відміну від іонносорбційного або електророзрядного не потребує прогріву.

Для контролю і вимірювання тиску у вакуумній камері можна використовувати магнітні манометри 10, які при відсутності забруднення парою масла працюють добре. Схема забезпечує граничний тиск у динамічному режимі  $10^{-7}$  Па, а після 4-6 годинного прогріву -  $10^{-8}$  Па.

## 5. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ СТІНОК ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ

Вакуумна камера має мати об'єм, що задається технологічним процесом, і в той же час мати достатню міцність. Розрахунок на міцність складається з визначення товщини стінок камери при використанні теорії тонкостінних оболонок.

Тонкостінна оболонка — це стінка, товщина  $\delta$  якої мала в порівнянні з радіусом її кривизни. До тонкостінних відносяться оболонки, в яких  $\delta / D \leq 0,04$  ( $D$  - внутрішній діаметр оболонки).

**Циліндрична обичайка.** Товщину  $\delta$  (м) циліндричної обичайки, навантаженої (при вакуумі) зовнішнім тиском  $p_o$ , розраховують за формулою



$$\delta = 1,25D \left( \frac{p_o}{E_t} \cdot \frac{l}{D} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

де  $p_o$  - зовнішній тиск (атмосферний) на камеру, **Па**;  $l$  - висота, **м**;  $E_t$  - модуль Юнга матеріалу обичайки при заданій температурі  $t$  **С**, **Па**;  $D$  - діаметр, **м**.

**Сферична оболонка.** Розрахунок товщини сферичної оболонки з п'ятикратним запасом виконують за формулою

$$\delta = 0,8D \sqrt{\frac{p_n \sqrt{3(1 - \alpha^2)}}{E_t}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Остаточну товщину сферичної оболонки вибирають за відповідним сортаментом.

## 6. ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ ГАЗУ В ТРУБОПРОВОДАХ

У процесі відкачки режим течії газу в трубопроводі вакуумної системи змінюється. Увесь процес відкачки поділяють, в головному, на три режими: в'язкісний, в'язкісно-молекулярний і молекулярний. Межі цих режимів визначають для повітря при 20° **С** за формулами:

$$\text{в'язкісний} \quad p_{cp}d \geq 1,33; \quad (3)$$

$$\text{в'язкісно-молекулярний} \quad 0,02 < p_{cp}d < 1,33; \quad (4)$$

$$\text{молекулярний} \quad p_{cp}d < 0,02, \quad (5)$$

де  $d$  - діаметр трубопроводу, **м**;  $p_{cp}$  - середній тиск газу в трубопроводі, **Па**.

Середній тиск визначають за формулою

$$p_{cp} = (p_1 + p_2) / 2 \quad (6)$$

де  $p_1, p_2$  - тиск газу на початку і в кінці трубопроводу відповідно.

## 7. ВИЗНАЧЕННЯ ГАЗОВИДІЛЕННЯ І НАТІКАННЯ

Газовий потік, що виникає при відкачці, складається з декількох складових:

$$Q = Qk + Qn + Qg + Qo, \quad (7)$$

де  $Qk$  - газовиділення з конструкційних матеріалів вакуумної камери;  $Qn$  - потік натікання через оболонку камери;  $Qg$  - газовиділення об'єкта відкачки (може бути заданим);  $Qo$  - потік газу, що знаходився у камері до початку відкачки (існує лише в неусталеному режимі роботи).

Газовиділення з конструкційних матеріалів виникає завдяки адсорбційному і дифузійному газовиділенню та газопроникненню і розраховується за формулою

$$Q_k = \sum_i^m q_i A_i, \quad (8)$$

де  $m$  - кількість матеріалів;  $q_i$  - питоме газовиділення матеріалів (див. Додаток 1, таб. 1.2);  $A_i$  - загальна площа конструкцій, що контактують з вакуумом,  $\text{м}^2$ .

Потік натікання можна розділити на дві складові:  $Q_n = Q_{нк} + Q_{нг}$ . (9)

Потік газу через стінки вакуумної камери внаслідок газопроникності стінок ( $Q_{нк}$ ) визначається за приблизним виразом

$$Q_{нк} = \sum_i^m \frac{\omega_i}{\delta_i} (\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2})_i \cdot A_i, \quad (10)$$

де  $\omega_i$  - газопроникність матеріалу ( наведена в Додатку 2 для  $\delta = 1 \text{ мм}$  і  $(\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2}) = 133 \text{ Па}$ ;  $p_1, p_2$  - зовнішній і внутрішній тиски відносно вакуумної камери, відповідно,  $\text{Па}$ ;  $A_i$  - площа стінок,  $\text{м}^2$ .

Потік можливої негерметичності  $Q_{нг} = k_v m Q_{теч}$ , (11)

де  $k_v = 0,1 \dots 0,3$  - ймовірність наявності течі, меншої, ніж чутливість течешукача;  $m$  - число послідовно виявлених місць можливої течі;  $Q_{теч}$  - найменший потік, що реєструється течешукачем, орієнтовно  $10^{-12} \text{ Па м}^3$ .

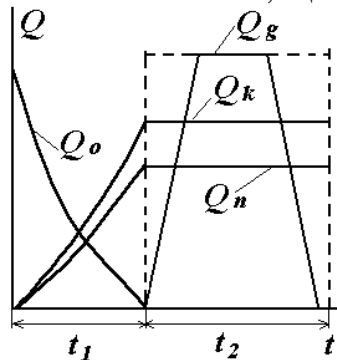


Рис. 5.

Газовий потік  $Q_g$ , якщо не заданий, то визначається як і  $Q_k$ , а потік  $Q_o$  існує лише під час неусталеного режиму роботи (на початку відкачки). Середнє значення величини  $Q_o$  розраховують за виразом

$$Q_o = p_o V_k, \quad (12)$$

де  $p_o$  - тиск у вакуумній камері на початку відкачки,  $\text{Па}$ ;  $V_k$  - об'єм камери,  $\text{м}^3$ . Залежність складових газового потоку від часу відкачки наведена на рис.5.

## 8. ВИБІР КОЕФІЦІЄТА ВИКОРИСТАННЯ НАСОСА

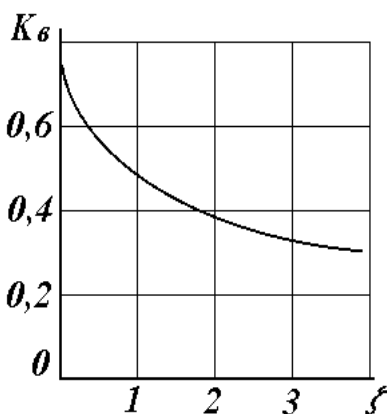


Рис. 6

Коефіцієнт використання насоса - це відношення ефективної швидкодії насоса до швидкодії на вхідному патрубку:  $K_v = S_{эф} / S_n$ . (13)

Величина  $K_v$  завжди менша за одиницю і залежить від параметра  $\xi$ , що являє собою відношення витрат на придбання та експлуатацію арматури до витрат на придбання та експлуатацію насосів. Якщо величину  $\xi$  вибрано, тоді  $K_v$  розраховують за

$$K_v = (1 - \sqrt{\xi}) / (1 - \xi). \quad (14)$$

Залежність  $K_v = f(\xi)$  наведена на рис. 6.

## 9. ВИБІР ВАКУУМНИХ НАСОСІВ

Одним вакуумним насосом неможливо забезпечити увесь діапазон відкачки, тому діапазон тиску від атмосферного до необхідного поділяють на піддіапазони відповідно до насосів, що будуть використовуватися.

Насоси поділяються на високовакуумні й середнього вакууму, масляні — дифузійні, пароструминні та механічні й безмасляні (чисті) — молекулярні й турбомолекулярні (масло лише в підшипниках).

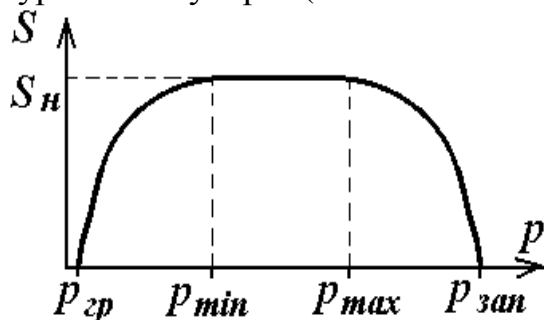


Рис. 7

Пароструминні масляні насоси забезпечують граничний тиск  $7 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^{-5}$  Па при випускному тиску  $7 \dots 13$  (інколи 250) Па. Турбомолекулярні насоси забезпечують тиск  $7 \cdot 10^{-2}$  Па при форвакуумі  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па.

До безмасляних “чистих” насосів відносяться гетерні, іонно-сорбційні, конденсаційні й магніторозрядні.

Як середньовакуумні використовують двороторні механічні насоси, що забезпечують залишковий тиск  $10^{-2}$  Па і мають велику швидкодію при малих габаритах.

Форвакуумні насоси — механічні, що забезпечують граничний тиск  $10^{-1}$  Па, не потребують попереднього розрідження. Вигляд залежності швидкодії насоса від тиску наведено на рис.7.

Граничний тиск насоса  $P_{гр}$  — це найменший тиск, що може забезпечити насос на входному патрубку без об'єкта відкачки. Найменший і найбільший робочі тиски  $P_{мін}$ ,  $P_{мах}$  — це найменший і найбільший відповідно тиски, за яких насос зберігає номінальну швидкодію  $S_n$  за час тривалої роботи. Тиск запуску насоса  $P_{зап}$  — це найбільший тиск на вихідному патрубку, при якому насос може працювати.

Вакуумні насоси потрібно вибирати для усталеного режиму роботи, коли задані газовий потік  $Q$  і робочий тиск у вакуумній камері. Умовою усталеності режиму течії газу є рівність швидкості відкачки і швидкості газовиділення:  $Se\phi = Sq$ .

При усталеному режимі течії газу, газовий потік, що проходить через вхідний поперечний переріз насоса, називають ще продуктивністю насоса:  $Q = P Se\phi$ .

Насос можна вибирати двома способами: 1) за швидкістю насоса  $S_n$  при заданих  $Q$ ,  $K_v$  та  $P$ ; 2) за заданою тривалістю  $t_1$  відкачки в неусталеному режимі.

Будемо вважати, що  $Q$ ,  $K_v$  і робочий тиск задані (або розраховані попередньо). Швидкість газовиділення за тиском  $p$  залежить від величини газового потоку відповідно до виразу  $Sq = Q/p$ , а ефективна швидкість насоса  $Se\phi = Sp K_v$ . Тут  $Sp$  — швидкість насоса за тиском  $p$  на входному патрубку. В каталогах на вакуумне обладнання наводиться максимальна швидкість насоса  $S_n$  і граничний тиск  $P_{гр}$ .

Ефективна швидкість насоса  $Se\phi$  зв'язана з максимальною швидкістю насоса виразом

$$Se\phi = S_n K_v. \quad (15)$$

Якщо використаємо умову усталеного режиму, то будемо мати

$$S_n = Q/(K_v P - P_{zp}). \quad (16)$$

При виборі за каталогом насоса з найменшою швидкодією потрібно прагнути, щоб насос мав  $P_{zp} \ll K_v P$ .

Використовуючи формулу (16), виберемо всі наступні насоси. При цьому робочим тиском  $i$ -го насоса  $p = p_i$  буде максимальний випускний тиск попереднього насоса. Для іонно-сорбційних насосів робочим буде тиск запуску  $p_{z(i-1)} : p_i = p_{z(i-1)} / \eta$ , де  $\eta$  - коефіцієнт запасу, що має величину від 2 до 10.

При другому способі вважаємо: якщо тиск нижче атмосферного, то течія газу при відкачці відбувається за ізотермічним законом,  $PV = Const$ . Використовуючи визначення  $Se\phi$ , як  $Se\phi = dV/dt$ , одержимо

$$dt = -V_k dp / (S_{ef} \cdot p). \quad (17)$$

Інтегруючи диференціальне рівняння (17) в межах  $t_o$  і  $t_1$  та  $p_o$  і  $p_1$ , одержимо

$$S_n = \frac{S_{ef}}{K_v} = \frac{V_k \ln(p_o / p_1)}{K_v (t_1 - t_o)}, \quad (18)$$

де припускається, що  $Se\phi = S_n K_v = Const$ ; вираз (18) зручний для вибору швидкодії насоса при молекулярному режимі течії газу, якщо тиск значно більший  $P_{zp}$  насоса.

При в'язкісному режимі течії газу

$$S_n = \frac{V_k \ln(p_o / p_1)}{(t_1 - t_o) - \frac{V_k l \cdot 10^{-3}}{0,68 d^4} \left( \frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_o} \right)}. \quad (19)$$

Тут  $V_k$  - об'єм вакуумної камери ( $\text{м}^3$ );  $t_o$  і  $t_1$  (с) та  $p_o$  і  $p_1$  (Па) - початковий і кінцевий моменти часу відкачки й тиски відповідно у в'язкісному режимі:  $d, l$  - діаметр і довжина вакуумного трубопровода (м).

Очевидно, що при використанні формули (19) потрібно вибрати конструктивні розміри трубопроводів.

## 10. ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РОЗМІРІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ І АРМАТУРИ

Загальну провідність  $U_o$  трубопровода від насоса до відкачуваного об'єкта знаходять з головного рівняння вакуумної техніки

$$U_o = S_n K_v / (1 - K_v), \quad (20)$$

де  $S_n$  вибирають з запасом.

Якщо на ділянці від насоса до відкачуваного об'єкта є декілька послідовно з'єднаних елементів - трубопроводів, уловлювачів, засувок і т.п., то

$$1/U_o = \sum_{i=1}^m 1/U_i, \quad (21)$$

де  $m$  - кількості елементів;  $U_i$  - провідність  $i$ -го елемента.

Таким чином, у цьому випадку загальна провідність завжди менша за провідність будь-якого з елементів.

При паралельному з'єднанні елементів вакуумної системи

$$U_o = \sum_{i=1}^m U_i. \quad (22)$$

Діаметр і довжину трубопроводів і отворів розраховують за їх провідностями за формулами, що наведені нижче, залежно від режиму течії газу й виходячи з умови конструктивного монтажу устаткування. Уловлювачі та засувки вибирають стандартними за відомими провідностями.

## 11. РОЗРАХУНОК ПРОВІДНОСТІ ОТВОРІВ І ТРУБОПРОВОДІВ ВАКУУМНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

Величина провідності відповідного елемента залежить від степеня вакууму (режиму течії газу).

**В'язкісний режим** ( повітр'я,  $T = 293 \text{ K}$ ).

Для отворів:

$$\begin{aligned} U_{отв} &= 766 r^{0,1} \sqrt{1-r^{0,3}} A / (1-r), & 0,5 \leq r = \frac{p_2}{p_1} < 1; \\ U_{отв} &= 200 A / (1-r), & 0,1 \leq r \leq 0,5; \\ U_{отв} &= 200 A, & 0 < r < 0,1; \end{aligned} \quad (23)$$

де  $U_{отв}$  - провідність,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $A$  - площа круглого отвору,  $\text{м}^2$ ;  $p_2$ ,  $p_1$  - тиск з обох боків отвору, відповідно, **Па**.

Оскільки величина коефіцієнта  $r$  заздалегідь невідома, то розрахунок виконують за методом послідовних наближень.

Для трубопровода діаметром  $d$  (м), довжиною  $l$  (м) і з тиском  $p_1$  і  $p_2$  (Па) на його кінцях, провідність ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) розраховують за формулою

$$U_m = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (24)$$

Для вентиля провідність  $U_{вент}$  розраховують як для трубопровода того ж діаметру, але  $l = (2 \dots 3) l_{вент}$

**Молекулярний режим.**

Провідність отвору,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$U_{отв} = 36,4 A \sqrt{T / \mu}, \quad (25)$$

де  $T$ ,  $\mu$  - температура і молекулярна маса газу, відповідно.

Для трубопровода і вентиля ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) ( повітр'я,  $T = 293 \text{ K}$ )

$$U_m = 121 d^3 / l, \quad (26)$$

$$U_{вент} = (0,06 \dots 0,15) U_{отв}, \quad (27)$$

де  $U_{отв}$  - провідність отвору того ж діаметру, що і вентиль.

Для коротких трубопроводів ( $l/d < 20$ )

$$U_m = 38,1 \sqrt{T/\mu} \frac{d^3}{l}. \quad (28)$$

### **Молекулярно-в'язкісний режим.**

$$U_{отв} = U_{отв}^M b + U_{отв}^6, \quad (29)$$

де  $b = [1+2,5d/(2\lambda)]/[1+3d/(2\lambda)]$ , а  $U_{отв}^M$  і  $U_{отв}^6$  - провідність отвору при молекулярному і в'язкісному режимах, відповідно;  $d$  - діаметр отвору, м;  $\lambda$  - довжина вільного пробігу молекул, м.

Провідність трубопроводу

$$U_m = U_m^M a + U_m^6, \quad (30)$$

де  $U_m^M$ ,  $U_m^6$  - провідність трубопроводу при молекулярному і в'язкісному режимах, відповідно;  $a$ —коефіцієнт, що дорівнює 0,8 на межі з в'язкісним режимом і 1 на межі з молекулярним режимом. Для технічних розрахунків беруть середню сталу величину коефіцієнта, що дорівнює 0,9.

Провідність вентиля

$$U_{вент} = U_{вент}^M + \frac{U_{вент}^6 - U_{вент}^M}{P_{вр} - P_{нж}} (P_i - P_n), \quad (31)$$

де  $U_{вент}^M$ ,  $U_{вент}^6$  - провідність вентиля при молекулярному і в'язкісному режимах, відповідно;  $P_{вр}$ ,  $P_{нж}$  - верхній і нижній тиск, відповідно, при молекулярно-в'язкісному режимі, Па;  $P_i$  - тиск, для якого визначається провідність вентиля.

Якщо трубопровід має прямокутних  $n$  згинів, то при молекулярному режимі вводиться ефективна довжина

$$l_{эф} = l_{геом} + 1,33 d \cdot n. \quad (32)$$

У в'язкісному режимі вплив згинів можна не враховувати.

Провідність затворів високого вакууму вибирають за паспортом.

При використанні різних газів потрібно помножити величину провідності на відношення коефіцієнтів в'язкості  $\eta_1/\eta_2$ ;  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  - для повітря та іншого газу, відповідно.

Перехід від однієї температури до іншої необхідно розраховувати за формулою

$$\frac{U_{T_1}}{U_{T_2}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}. \quad (33)$$

## **12. ГРАФІЧНА ПЕРЕВІРКА ВИБОРУ ВАКУУМНИХ НАСОСІВ**

Для перевірки правильності вибору вакуумних насосів будують на одному рисунку залежності швидкодії цих насосів від тиску  $Sn_i = f(p)$  у логарифмічному масштабі по осі тиску, подібно до рис. 8. Залежності швидкодії насосів від тиску можна знайти у довідниковій літературі. На цьому ж рисунку бу-

дують графік швидкості натікання і газовиділення  $Sq = Q/p$ , а також графіки  $Se\phi i = f(p)$ , що визначають з головного рівняння вакуумної техніки за відомою провідністю трубопроводів:

$$Se\phi 1 = S_{H1} U_1 / (S_{H1} + U_1); Se\phi 2 = S_{H2} U_2 / (S_{H2} + U_2), \quad (34)$$

де  $U_1, U_2$  - провідності трубопровода від першого насоса до відкачуваного об'єкта і від другого насоса до першого, відповідно, залежно від середнього тиску в них. Провідність  $U_i$  пов'язана із загальною провідністю вакуумної системи  $U_0$  (див. розд.10). Загальна провідність  $U_0$  змінюється при зміні режимів течії газу.

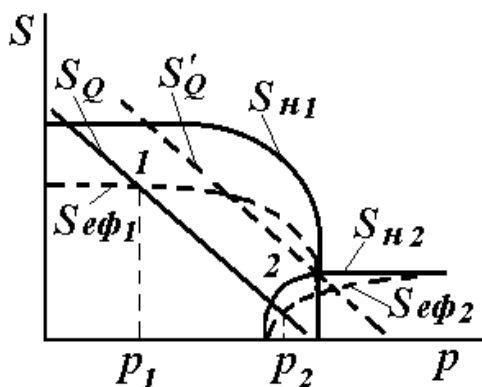


Рис. 8

Приблизний розрахунок провідності  $U''_0$  при одному режимі за відомою провідністю  $U'_0$  при іншому можна виконувати за формулою  $U''_0 = (B''/B') U'_0$ , (35) де величина коефіцієнта  $B = 12,1 d^3$  - для молекулярного режиму течії повітря;  $B = 10,9 d^3 + 182 d^4 p_{cp}$  - для молекулярно-в'язкісного режиму;  $B = 182 d^4 p_{cp}$  - для в'язкісного режиму. Температура -  $T=293$  К;

одиниці для  $l$  і  $d$  -  $10^{-2}$  м, а для  $p$  -  $133$  Па. Точка 1 перетину кривих  $Se\phi 1$  і  $Sq$  відповідає усталеному режиму роботи першого насоса. Тиск  $p_1$  має бути в межах робочого тиску першого насоса. Аналогічно за перетином кривих  $Se\phi 2$  і  $Sq$  можна знайти робочий тиск другого насоса  $p_2$ .

Якщо газовиділення мале, умовою запуску системи є взаємний перетин кривих  $Se\phi 1$  і  $Se\phi 2$ . При цьому другий насос працює за тиском, близьким до граничного. У випадку великих газовиділень достатньою умовою запуску системи можна вважати відсутність подвійного перетину кривих  $Sq$  і  $Se\phi 1$  у проміжку тисків від  $p_1$  до  $p_2$ . У іншому разі (див.  $Sq$ ) запуск системи буде неможливим.

При правильному виборі насосів сумісність їх роботи виконується автоматично. При змінному натіканні і газовиділенні сумісність роботи механічних насосів визначають за методом, описаним у [2, с.197].

### 13. РОЗРАХУНОК РОЗПОДІЛУ ТИСКУ У ВАКУУМНІЙ СИСТЕМІ

Розподіл тиску у вакуумній системі в усталеному режимі розраховують виходячи з уявлення про існування прямого і зворотного потоків і при використанні головного рівняння вакуумної техніки.

Тиск  $p_i$  у будь-якому  $i$ -му перетині знаходять за виразом

$$p_i = \frac{Q}{U_i} + \frac{Q}{S_n} + p_{cpi}, \quad (36)$$

де  $Q$  - продуктивність відкачки;  $U_i$  - провідність трубопровода від насоса до  $i$ -го перетину;  $p_{cpi}$  - граничний тиск насоса в розглядуваному перетині.

## 14. РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ВІДКАЧКИ ПРИ НЕУСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ

Для високовакуумної відкачки при молекулярному режимі течії газу тривалість відкачки  $t$  розраховують за виразом

$$t = \frac{V_k}{S_n K_v} \ln(p_1 / p_2). \quad (37)$$

Тут  $V_k$  - об'єм камери, ( $\text{м}^3$ );  $p_1, p_2$  - тиск на початку і в кінці роботи, відповідно, (Па). Величини  $S_n$  та  $K_v$  вважаються постійними, а потік газовиділення  $Q = 0$ .

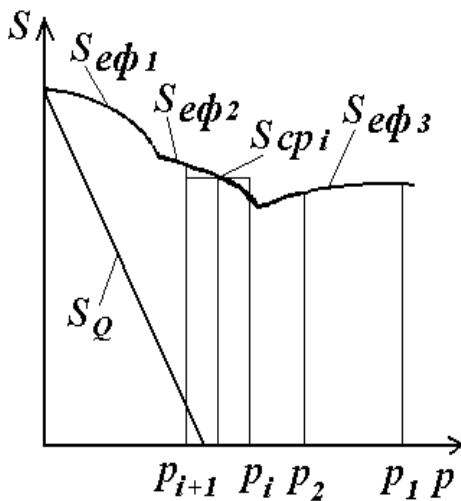


Рис. 9.

У випадку, коли  $Q \neq 0$ , для розрахунку тривалості відкачки застосовують графічний метод (див. рис.9): будують графіки залежності  $Se\phi_i = f(p)$  та  $S_q = Q/p$ ; розбивають на діапазони тиск від атмосферного до робочого(можливо за режимами) і в кожній частині визначають середню величину  $S_{cpi}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) за формулою

$$S_{cpi} = \frac{(S_{e\phi i} - S_{Q i}) + (S_{e\phi i+1} - S_{Q i+1})}{2}. \quad (38)$$

Тривалість відкачки розраховують за формулою

$$t = V_k \sum_{i=1}^m \frac{\ln(p_i / p_{i+1})}{S_{cpi}}. \quad (39)$$

## 15. РОЗРАХУНОК ФОРВАКУУМНОГО БАЛОНА

Форвакуумний балон, що дозволяє вимикати на довгий час обертовий насос під час роботи вакуумної системи, розміщують між високовакуумним і попереднього розрідження обертовим насосами.

Проміжок часу  $t_1$ , протягом якого може бути вимкнутим обертовий насос, вибирають рівним часу виходу на усталений режим роботи системи. Тоді об'єм  $V_\phi$  ( $\text{м}^3$ ) форвакуумного балона знаходять за виразом

$$V_\phi = Q \cdot t_1 / (p_k - p_n). \quad (40)$$

Тиск  $p_n$  відкачки балона розраховують за формулою  $p_n = Q / (S_n K_v)$ ;  $S_n$ ,  $K_v$  - швидкодія і коефіцієнт використання обертового насоса, а  $p_k = (0,3 - 0,5) p_{e \max}$ ;  $p_{e \max}$  - максимальний випускний тиск високовакуумного насоса, Па.



## 16. ПЕРЕЛІК ТИПОВИХ ЗАВДАНЬ

**1. Розрахунок пропускної здатності трубопроводу високовакуумної установки за типом ВУП-5 для досягнення вакууму  $6 \cdot 10^{-6}$  Торр.**

### *Завдання*

- а) Ознайомитись: з параметрами насосів установки ВУП-5; з приладами, що показують тиску для вимірювання середнього й високого вакууму;
- б) Розрахувати: вакуумну камеру; пропускну здатність трубопроводу; тривалість відкачки.

**2. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для наплення тонких алюмінієвих плівок на скляну підложку розмірами  $7 \times 7$  см.**

### *Завдання*

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру; прилади для вимірювання і контролю тиску;
- б) Розрахувати: вакуумну камеру; об'єм форвакуумного балона; тривалість відкачки.

**3. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для градування датчика ПТ-2 за допомогою скляного дозувального пристрою.**

### *Завдання*

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру; датчики тиску;
- б) Розрахувати:  $Q_{prv}$  дозувального пристрою; величину збільшення тиску  $\Delta p$  в системі при напусканні порції газу, якщо об'єм системи  $N$  л.

**4. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для перевірки іонізаційного манометра ПІ-2 за допомогою абсолютного манометра.**

### *Завдання*

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру; датчики тиску;
- б) Розрахувати: постійну компресійного манометра з лінійною шкалою; розподіл тиску в системі; тривалість відкачки; форвакуумний балон.

**5. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для прогартування вольфрамових ниток до температури  $1000^\circ \text{C}$ .**

### *Завдання*

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру при об'ємі вакуумної камери  $N$  л.; необхідні датчики тиску;
- б) Розрахувати: вакуумну камеру для розміщення  $N$  ниток, довжиною  $L$  см. і діаметром  $D$  мм.; величину потоку газовиділення ниток; величину потоку газонатікання в камеру; тривалість відкачки для виходу на робочий режим.

## **6. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для виробництва пальників ламп ДНаТ.**

### **Завдання**

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру при об'ємі вакуумної камери  $N$  л.; необхідні датчики тиску;
- б) Розрахувати: вакуумну камеру для розміщення  $N$  пальників; величину потоку газовиділення конструктивних елементів; величину потоку газонатікання в камеру; тривалість відкачки для виходу на робочий режим.

## **7. Розрахунок елементів і характеристик вакуумної установки для виробництва пальників ламп ДРЛ.**

### **Завдання**

- а) Вибрати: необхідні насоси й арматуру при об'ємі вакуумної камери  $N$  л.; необхідні датчики тиску;
- б) Розрахувати: вакуумну камеру для розміщення  $N$  пальників; величину потоку газовиділення конструктивних елементів; величину потоку газонатікання в камеру; тривалість відкачки для виходу на робочий режим.

## **17. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ВІДКАЧКИ ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ**

Спочатку отримаємо загальну формулу розрахунку тривалості відкачки. Для цього позначимо об'єм вакуумної системи, в якій буде створюватися вакуум, як  $V$ , а швидкодію її відкачки за тиском  $p_1$ , як  $S_o$ . Будемо вважати, що натікання та газовиділення відсутні, а пониження тиску в процесі відкачки відбувається за політропним законом, тобто

$$p_1 V^n = \text{Const}, \quad (41)$$

де  $n$  – показник політропи. Після диференціювання цього рівняння і наступного розділення на проміжок часу  $dt$  отримаємо з урахуванням, що  $dV/dt = S_o$

$$dt = -\frac{V}{S_o n} \frac{dp_1}{p_1} = -\frac{V_{np}}{S_o} \frac{dp_1}{p_1}; \quad (42)$$

де  $V_{np}$  – приведений об'єм.

Оскільки швидкодія відкачки  $S_o$  зв'язана з провідністю трубопроводу  $U$  і швидкодією насоса  $S_n$  головним рівнянням вакуумної техніки, то для визначення тривалості відкачки можна використовувати формулу

$$dt = -V_{np} \left( \frac{S_n + U}{S_n U} \right) \frac{dp_1}{p_1}. \quad (43)$$

Залежно від співвідношення провідності трубопроводу і швидкодії насоса формула може мати різні варіанти:

а) **тривалість відкачки, якщо провідність трубопроводу значно більша за швидкодію насоса** ( $U \gg S_n$ ).

Це може бути, якщо трубопровід короткий і має великий діаметр. Тоді величиною  $1/U$  можна знехтувати і визначати тривалість відкачки за формулою

$$dt = - \frac{V_{np}}{S_n} \frac{dp_1}{p_1}. \quad (44)$$

Після інтегрування в межах  $(t'_1, p'_1); (t''_1, p''_1)$ , де швидкодія насоса має

середнє значення  $S'_n$  отримаємо: 
$$t' = t''_1 - t'_1 = 2,3 \frac{V_{np}}{S'_n} \lg \frac{p'_1}{p''_1}. \quad (45)$$

Очевидно, для зменшення похибки підрахунку залежно від вибору середнього значення  $S'_n$  необхідно розділити межі інтегрування на декілька послідовних відповідно менших відрізків з окремим вибраним середнім значенням залежно від зміни швидкодії насоса. Тоді загальна тривалість відкачки дорівнюватиме сумі відповідно окремо знайдених тривалостей. Щоб знати як змінюється швидкодія насоса залежно від тиску, необхідно використовувати паспортні дані вибраного насоса.

Слід зазначити, що в міру зниження тиску у вакуумній системі він може наблизитися до граничного значення  $p_{zp}$  насоса. Тому на останньому відрізку, якщо  $p_1 < 10 p_{zp}$ , під знаком логарифма слід брати відношення  $(p_1^{(n-1)} - p_{zp}) / (p_1^{(n)} - p_{zp})$ ;

б) **тривалість відкачки, якщо провідність трубопроводу значно менша за швидкодію насоса** ( $U \ll S_n$ ).

У цьому випадку можна знехтувати величиною  $1/S_n$ , тоді

$$dt = - \frac{V_{np}}{U} \frac{dp_1}{p_1}. \quad (46)$$

Оскільки провідність вакуумпроводу залежить від режиму течії газу, то це треба враховувати, тоді:

1) тривалість відкачки при **молекулярному режимі** (провідність  $U_m$  не залежить від тиску) визначають за формулою

$$t = 2,3 \frac{V_{np}}{U_m} \lg \frac{p'_1}{p''_1} \quad (47)$$

і якщо  $p_1 < 10 p_{zp}$ , то під знаком логарифма слід також брати зазначене вище відношення;

2) при **молекулярно-в'язкісному режимі** провідність вакуумпроводу залежить від середнього тиску у вакуумпроводі, її можна визначити за формулою: 
$$U_{m-в} = U_m b + U_в = b \cdot 122 d^3 / l + 1,36 \cdot 10^3 \cdot p_{cp} \cdot d^4 / l, \quad (48)$$

де  $b$  можна прийняти рівним від 0,8 до 1;  $l$  – довжина,  $d$  – діаметр вакуумпроводу (м), відповідно;  $p_{cp}$ , **Па**, тоді тривалість відкачки буде визначатися за формулою

$$t = 2,3 \frac{V_{np}}{U_m 0,9} \left( \lg \frac{p_1'}{p_1''} - \lg \frac{0,9 + ap_1'}{0,9 + ap_1''} \right). \quad (49)$$

Оскільки визначення провідності вакуумпроводу при цьому режимі течії газу включає межуючі режими, то тривалість відкачки за наведеною формулою можна визначати також і окремо для молекулярного або в'язкісного режиму.

При в'язкісному режимі провідність вакуумпроводу діаметром  $d$  (м) і довжиною  $l$  (м) за середнім тиском  $(p_1 + p_2)/2 = p_1/2$  (**Торр**) визначається простішим виразом:  $U_g = ap_1$ , де

$$a = 2,81 \frac{d^4}{2l\lambda_{co}} \sqrt{\frac{T}{\mu}}; \quad (50)$$

$\lambda_{co}$  – середня довжина вільного пробігу молекул газу, визначена за тиском в 1 **Торр**.

У цьому випадку, використовуючи загальну формулу (43), після інтегрування отримаємо, що тривалість відкачки при **в'язкісному режимі**

$$t = V_{np} \int_{p_1''}^{p_1'} \frac{(S_n + cp_1) dp_1}{(S_n ap_1) p_1} = \frac{V_{np}}{a} \left( \frac{1}{p_1''} - \frac{1}{p_1'} \right) + 2,3 \frac{V_{np}}{S_n} \lg \frac{p_1'}{p_1''}. \quad (51)$$

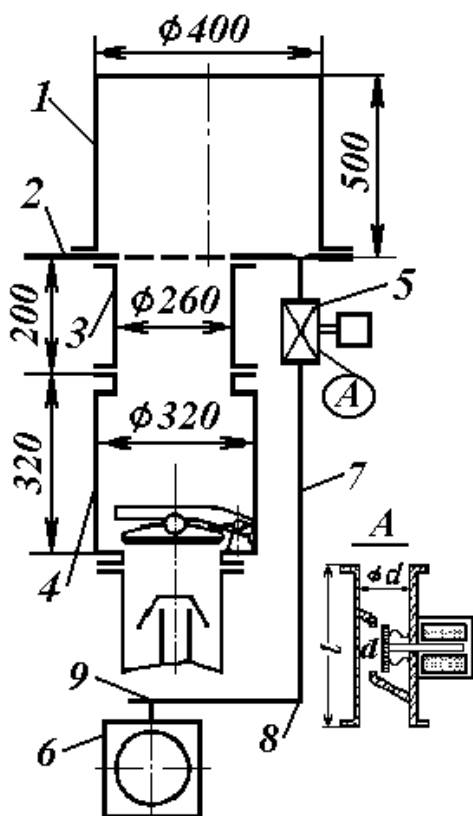


Рис. 10.

Як **приклад розрахунку** вакуумних систем розглянемо розрахунок тривалості відкачки повітря при температурі 20° С від атмосферного тиску 760 **Торр** ( $1,01 \cdot 10^5$  **Па**) до необхідного тиску  $4 \cdot 10^{-2}$  **Торр** (5,32 **Па**) у вакуумній системі, що наведена на рис. 10.

Ця вакуумна система складається з циліндричної вакуумної камери 1 відповідних розмірів, розміщеної на підтримуючій плиті 2, з'єднувального перехідного циліндричного патрубку 3 відповідних розмірів, корпусу вакуумного затвора 4, через який приєднується високовакуумний насос, електромагнітного клапана 5, обертового вакуумного насоса 6 й вакуумного трубопровода 7, що має два коліна 8 і 9 з кутом згину 90°. Вакуумний трубопровід має діаметр 3,2 см і загальну довжину 1,04 м.

Вказаний необхідний тиск може бути створений за допомогою механічного обертового насоса ВН-2 МГ попереднього вакууму. За паспортними даними залежність швидкодії цього насоса має вигляд, наведений на рис. 11.

Будемо вважати, що газовиділення зі стінок вакуумної камери є постійною величиною, що дорівнює  $Q = 1,88 \cdot 10^{-3}$  л. Торр /с ( $2,43 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с).

Спочатку визначимо межі за тиском режимів течії газу, за якими буде відбуватися відкачка:

- 1) межа між в'язкісним і молекулярно-в'язкісним режимами

$$p_{в.м-в} = \frac{1}{3,2} = 0,312 \text{ Торр (41,6 Па)},$$

- 2) межа між молекулярно-в'язкісним режимами і молекулярним режимами

$$p_m = \frac{0,015}{3,2} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Торр (0,624 Па)}.$$

Перш ніж розраховувати тривалість відкачки від атмосферного тиску до межі, коли починається в'язкісний режим, порівняємо провідність вакуумпроводу і швидкодію насоса.

Швидкодія насоса у цих межах дорівнює 5,8 л/с (див. рис. 11), а провідність вакуумпроводу

$$U_v = 1,88 \cdot 10^{-5} \frac{(32)^4 \cdot 760}{104 \cdot 2} = 72 \text{ л/с},$$

тобто остання значно більша.

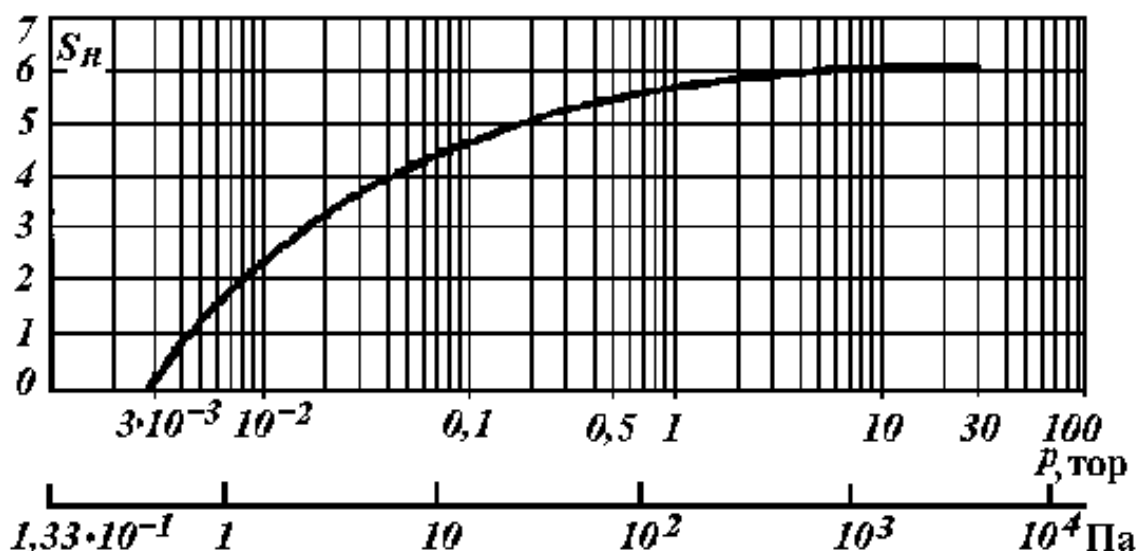


Рис. 11.

Тепер знаходимо загальний об'єм, що відкачується, а потім приведений об'єм, враховуючи, що коефіцієнт політропи для повітря  $n = 1,2$ , остаточно тривалість відкачки.

$$V_3 = V_{вк} + V_{напр} + V_{затв} = \frac{\pi}{4} (400^2 \cdot 500 + 260^2 \cdot 200 + 320^2 \cdot 320) \cdot 10^6 = 99,2 \text{ л.}$$

$$V_{np} = \frac{99,2}{1,2} = 82,7 \text{ л.}$$

$$t_1 = 2,3 \frac{82,7}{5,8} \lg 760 = 95 \text{ с.}$$

Далі знайдемо тривалість відкачки в межах в'язкісного і молекулярно-в'язкісного режимів, тобто від 1 **Торр** до 0,312 **Торр**.

Спочатку знайдемо загальну провідність вакуумпроводу й послідовно з'єднаного з ним електромагнітного клапана ДУ-32 ( $l_{кл} = 120 \text{ мм}$ ,  $d = 32 \text{ мм}$ ) для в'язкісного режиму.

Вплив наявності колін на вакуумпроводі враховуємо введенням ефективної довжини за формулою  $l_{ef} = l + 1,33nd$ , де  $n$  – число колін.

Провідність вакуумпроводу знайдемо за формулою

$$U_{вп} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l_{ef}} p_{в.м-в} (\text{м}^3/\text{с}),$$

а клапана -

$$U_{в.кл} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{ml_{кл}} p_{в.м-в} (\text{м}^3/\text{с}),$$

де  $m$  – уточнювальний множник, що вибирається в межах від 2 до 3.

Загальну провідність вакуумної магістралі знаходимо за формулою послідовного з'єднання

$$U_{заг} = \frac{U_{вп} \cdot U_{кл}}{U_{вп} + U_{кл}};$$

$$l_{ef} = 1,04 + 1,33 \cdot 2 \cdot 0,032 = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{вп} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} 41,6 = 5,27 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} = 52,7 \text{ л/с};$$

$$U_{кл.в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{2,5 \cdot 0,12} 41,6 = 0,1977 \text{ м}^3/\text{с} = 198 \text{ л/с};$$

$$U_{заг} = \frac{52,7 \cdot 198}{52,7 + 198} = 41,6 \text{ л/с.}$$

Використовуємо формулу (51) і знаходимо тривалість відкачки у в'язкісному режимі:

$$t_2 = \frac{83 \cdot 87}{41,6} \left( \frac{1}{41,6} - \frac{1}{133} \right) + 2,3 \frac{83}{5,8} \lg \frac{133}{41,6} = 19,5 \text{ с.}$$

Тепер залишилося знайти тривалість відкачки до заданого тиску, тобто від 0,312 **тор** до  $4 \cdot 10^{-2}$  **Торр**.

Оскільки ці межі тиску відповідають молекулярно-в'язкісному режиму течії газу, то необхідно буде використовувати і відповідні формули для розрахунку провідностей вакуумпровода і клапана, а також враховувати зміну швидкодії насоса. У зв'язку з цим поділимо цей діапазон тиску на такі відрізки: 1 – від 41,6 **Па** до 20 **Па**; 2 – від 20 **Па** до 10 **Па**; 3 – від 10 **Па** до 5, 32 **Па** і на кожному знайдемо середній тиск.

При розрахунках на останньому відрізку необхідно врахувати граничний тиск насоса ВН-2 МГ ( $p_{cp} = 3,06$  **Па**) і задане газовиділення.

Провідність вакуумпровода у молекулярно-в'язкісному режимі знайдемо за формулою

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l_{ef}} \frac{p_1 + p_2}{2} + 122 \cdot \frac{d^3}{l_{ef}} \cdot b;$$

провідність клапана –

$$U_{кл.м-в} = U_{кл.м} + \frac{U_{кл.в} - U_{кл.м}}{p_v - p_m} (p_i - p_m),$$

де  $p_i$  – середній тиск на відповідному відрізку,  $U_{кл.в}$ ,  $U_{кл.м}$  – провідність клапана у в'язкісному і молекулярному режимі, відповідно. Провідність клапана у молекулярному режимі визначається як 10 % від провідності отвору, тобто  $U_{кл.м} = 0,1 \cdot 36,4 \cdot S \sqrt{T/\mu}$ , де  $S$  – площа отвору. Для повітря ця формула буде такою  $U_{кл.м} = 9,1 \cdot d^2$ .

Виконаємо відповідні розрахунки для першого відрізка, на якому

$$p_{cp} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{41,6 + 20}{2} = 30,8 \text{ Па};$$

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 30,8 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} \cdot 0,8 = 0,042 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (30,8 - 0,624) = 0,148 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,042 \cdot 0,1485}{0,042 + 0,1485} = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Оскільки середня швидкодія насоса на цьому відрізку приблизно така, як і раніше, то відповідно до загальної формули тривалість відкачки на цьому відрізку буде

$$t_3 = 2,3 \frac{83 \cdot (5,8 + 33)}{5,8 \cdot 33} \lg \frac{41,6}{20} = 12,3 \text{ с}.$$

Розраховуємо тривалість відкачки на другому відрізку, на якому  $p_{cp} = 15$  **Па**;

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 15 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} \cdot 0,9 = 0,022 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (15 - 0,624) = 0,076 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,022 \cdot 0,076}{0,022 + 0,076} = 0,017 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Середня швидкодія насоса на цьому відрізку  $S_n \approx 4,5 \text{ л/с}$  (рис. 11), тому тривалість відкачки

$$t_4 = 2,3 \frac{83 \cdot (4,5 + 17)}{4,5 \cdot 17} \lg \frac{20}{10} = 16,2 \text{ с}.$$

На останньому відрізку, де середній тиск  $p_{cp} = 7,66 \text{ Па}$ , необхідно врахувати зростання граничного тиску, що досягається у вакуумній системі з причини газовиділення зі стінок вакуумної системи (або конструктивних елементів).

Спочатку аналогічно знаходимо загальну провідність вакуумної магістралі

$$U_{вн.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 7,66 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} 1,0 = 0,0133 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (7,66 - 0,624) = 0,042 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,0133 \cdot 0,042}{0,0133 + 0,042} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Середня швидкодія насоса на цьому відрізку  $S_n \approx 1,6 \text{ л/с}$ , тому відповідна середня швидкодія відкачки системи буде

$$S_o = \frac{S_n \cdot U_{заг}}{S_n + U_{заг}} = \frac{1,6 \cdot 10}{1,6 + 10} = 1,38 \text{ л/с}.$$

Додатковий до граничного тиск, що створюється потоком газовиділення, це  $p_{зв} = Q_{зв} / S_o$ , а граничний тиск насоса ВН-2МГ  $p_{cp} = 3,06 \text{ Па}$ , тоді загальний граничний тиск у вакуумній системі буде

$$p_{з.зр} = p_{зв} + p_{cp} = 2,43 / 0,00138 + 3,06 = 3,24 \text{ Па}$$

Тривалість відкачки на останньому відрізку

$$t_5 = 2,3 \frac{83 \cdot (1,6 + 10)}{1,6 \cdot 10} \lg \frac{10 - 3,24}{5,32 - 3,24} = 70,85 \text{ с}.$$

Остаточна загальна тривалість відкачки вакуумної системи від атмосферного тиску до заданого буде

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 95 + 19,5 + 12,3 + 16,2 + 70,85 \approx 214 \text{ с}.$$

## 18. ПРИКЛАД ЕЛЕМЕНТІВ ОДНОГО З МЕТОДІВ ПОВІРОЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Задано:  $V_k$  - об'єм вакуумної камери,  $p_p$  - робочий тиск у вакуумній камері,  $p_o$  - початковий тиск,  $t$  - час, за який необхідно створити робочий тиск.



Знайдемо ефективну швидкість вакуумного насоса, тобто швидкість відкачки вакуумної системи, яка необхідна щоб задовольнити умову за тривалістю відкачки.

$$S_o = \frac{V_k}{n \cdot t} \ln \frac{p_o}{p_p}$$

Будемо вибирати вакуумні насоси за такої умови:

- для високовакуумної системи

$$S_n = (1,3 - 2,5) S_o ;$$

- для низьковакуумної системи

$$S_n = (1,1 - 1,2) S_o .$$

Якщо потік газовиділення і натікання  $Q$  такий, що його необхідно врахувати, тоді

$$S_o = \frac{V_k}{n \cdot t} \ln \frac{p_o}{p_p} + \frac{Q}{p_p}$$

Оцінити тривалість відкачки на початку розрахунків можна за формулою

$$t = A \frac{V_k}{S_n} \lg \frac{p_o}{p_p} \text{ (с)},$$

де  $A$  – коефіцієнт, що дорівнює 2,5 – 3,0 для механічних і 3 – 5 для бустерних насосів.

Звичайно вакуумна система складається не менше ніж з двох насосів, тому при виборі насоса попереднього розрідження необхідно врахувати умову самоузгодженої роботи. Вакуумна система буде працювати, якщо низьковакуумний насос буде ефективно видаляти потік газу, що створюється високовакуумним насосом. Можна вважати, що така робота буде забезпечена, якщо

$$(S_n p_{zp})_1 = (1,5 - 2) (S_n p_{zp})_2 ,$$

де  $(S_n p_{zp})_1$  - добуток швидкості і граничного тиску низьковакуумного (першого) насоса.

Якщо розміри вакуумної системи остаточно визначені, то спочатку розраховують провідності елементів вакуумної системи відповідно до режимів течії газу. Потім знаходять необхідну швидкість насоса з головного рівняння вакуумної техніки і визначають граничний тиск цього насоса за виразом

$$p_{zp} = \frac{S_o p_p}{S_n} .$$

Після цього можна вибрати необхідний високовакуумний насос.

Якщо  $S_o$  і  $S_n$  були визначені попередньо, то найменшу провідність необхідного вакуумпровода можна знайти за виразом

$$U_{\min} = \frac{S_o}{1 - S_o / S_n} .$$

Слід пам'ятати, що реальний вакуумпровід повинен мати провідність в 1,5 – 2 рази більшу за найменшу, оскільки дійсна і номінальна продуктивність насосів на практиці може мати відхилення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенченко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем.- М.: Высш.шк., 1979. – 504 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. - М.: Высш.шк., 1990. – 320 с.
3. Ворончев Т.А., Соболев В.Д.. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш.шк., 1967. – 352 с.
4. Фролов Е.С., Русак Ф.А. и др.. Вакуумные системы и их элементы.- М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
5. Королев Б.И. и др.. Основы вакуумной техники.- М.: Наука, 1975. – 463 с.
6. Данилин Б.С. Минайчев В.Е. Основы конструирование вакуумных систем.- М.: Энергия, 1971. – 304 с.
7. Намитоков К.К., Рой В.Ф., Норко В.И. Основы технологии производства дуговых ламп высокой интенсивности. – К.: УМК. ВО, 1991. – 308 с.
8. Шепілко Є.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу Вакуумна техніка. –Х.: ХДАМГ, 2008.
9. Шепілко Є.В. Конспект лекцій з курсу “Електротехнологічні установки та пристрої. Вакуумна техніка”. Харків: ХНАМГ, 2005. – 102 с.
10. Денисов В.П. Производство электрических источников света.- М.: Энергия, 1975. – 384 с.
11. Волкова З.П., Хотин В.М. Материалы электровакуумного производства.- Л.: Энергия, 1980. – 216 с.
12. Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок.- М.: Энергия, 1967.– 312 с.
13. Минайчев В.Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок.- М.: Энергия, 1978. – 304 с.
14. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме.- М.Л: Госэнергоиздат, 1963. – 608 с.
15. Пивоваров Г.Я., Саминский Л.А. Технологические процессы электровакуумного производства.- М.: Энергия, 1975. – 304 с.

## ДОДАТКИ

Додаток 1  
Таблиця Д.1.1.

**Довідкові дані. Одиниці вимірювання тиску та їх співвідношення**

<b>1 Па = <math>10^{-5}</math> бар</b>	<b>1 мм.рт.ст. = 1 Торр = 133 Па</b>
<b>1 Па = <math>10^{-3}</math> п'єза</b>	<b>ГПа (ГігаПаскаль) = <math>1 \times 10^9</math> Па</b>
<b>1 Па = <math>7,50 \times 10^{-5}</math> мм. рт. ст.</b>	<b>1 Па = <math>9,87 \times 10^{-6}</math> атм.</b>

Таблиця Д.1.2.

**Питома швидкість газовиділення з поверхні металів при кімнатній температурі**

Метали	Питома швидкість газовиділення $q_i$ , $\text{м}^3 \text{Па}/(\text{м}^2 \text{с})$	Тривалість відкачки, доба
Нержавіюча сталь	$1,7 \times 10^{-4}$	1
Мідь	$1,6 \times 10^{-5}$	2
Алюміній	$(4 \dots 9) \times 10^{-6}$	2
Латунь	$3,38 \times 10^{-4}$	1
Вольфрам	$1,3 \times 10^{-6}$	2
Нікель	$(7 \dots 8) \times 10^{-6}$	2

Таблиця Д.1.3.

**Температура випарювання металів, С**

Метал	Температура плавлення	Температура кипіння	Тиск пари при $t_{пл}$ ; Торр	Температура С; при $p_{нас} = 10$ Торр	Швидкість випарювання $\times 10^{-4} \text{ г}/(\text{см}^2 \text{с})$
Алюміній	660	2060	$1,2 \times 10^{-6}$	996	0,85
Нікель	1455	2730	$4,4 \times 10^{-3}$	1510	1,06
Мідь	1083	2590	$3,0 \times 10^{-4}$	1273	1,18

Таблиця Д.1.4.

**Характеристики механічних насосів з масляним ущільненням**

	ВН-461М	ВН-494	НВЗ-20	ВН-2МГ	ВН-1МГ	ВН-7	ВН-6Г	НВЗ-300	НВЗ-500
Швидкодія, $\times 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$	0,21	0,78	20	5,8	16,5	59	120	300	500
Залишковий тиск, Па	2,6	2,6	0,3	3	3	4	6,5	6,5	6,5
Діаметр умовного проходу впускного патрубку, мм	14	14	50	63	75	160	150	200	250

**Таблиця Д.1.5.**

**Характеристики двороторних механічних насосів**

	ДВН-5-2	ДВН-50	ДВН-150	2ДВН-500	3ДВН-150	2ДВН-1500	3ДВН-1500
Швидкодія в діапазоні (1-6,6) Па, м <sup>3</sup> /с	0,01	0,045	0,120	0,500	0,500	1,50	1,50
Залишковий тиск, Па	$5,3 \times 10^{-2}$	0,66	0,66	0,4	0,4	0,53	0,53
Найбільший тиск запуску, Па	133	133	660	133	266	133	266
Діаметр умовного проходу впускного патрубку, мм	40	85	100	175	175	250	250
випускного, мм	14	63	75	100	100	150	150

**Таблиця Д.1.6.**

**Адсорбційні вакуумні агрегати**

	ЦВА-0,1-1	ЦВА-1-1	ЦВА-0,1-2	ЦВА-1-2
Швидкодія, м <sup>3</sup> /с	0,002	0,006	0,002	0,006
Граничний тиск, Па	1	1	1	1
Об'єм відкачки, м <sup>3</sup>	0,010	0,010	0,010	0,010
Час відкачки до граничного тиску, с	1	1	2	2
Час регенерації при відносному тиску, с	3	3	3	3
Споживана потужність при регенерації, Вт	400	825	400	825

**Таблиця Д.1.7.**

**Адсорбційні вакуумні насоси**

	ЦВН-0,1-2	ЦВН-0,3-2	ЦВН-1-2	ЦВН-1,5-3
Швидкодія (м <sup>3</sup> /с)	0,002	0,004	0,006	0,010
Граничний тиск, Па	1	6,5	1	2,5
Об'єм відкачки, м <sup>3</sup>	0,1	0,03	0,1	0,1
$t_{\text{с}}$ , с	1	1,5	1	1
$t_{\text{р}}$ , с	3	2	3	3

Таблиця Д.1.8.

## Характеристики турбомолекулярних насосів

	ТМН-100	ТМН-200	ТМН-500	ТМН-5000
Швидкодія ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) у діапазоні $(6,6 \times 10^{-1} - 10^{-6}) \text{Па}$	0,13	0,25	0,5	4,80
Залишковий тиск, <b>Па</b>	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
Діаметр патрубків, <b>мм</b>				
впускного	25	160	260	500
випускного	20	50	85	100

Таблиця Д.1.9.

## Характеристики електророзрядних насосів з охолодженням

	НМДО-001-1	НМДО-0025-1	НМДО-010-1	НМДО-05-1
Швидкодія ( $\text{м}^3/\text{с}$ )	0,010	0,025	0,10	0,280
Робочий тиск, <b>Па</b>	$10^{-6} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Попередній тиск, <b>Па</b>	$6,5 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-7}$
Діаметр впускного патрубків, <b>мм</b>	32	100	100	160
Залишковий тиск, <b>Па</b>	6,5	6,5	6,5	6,5

Таблиця Д.1.10.

## Характеристики гетеро-іонних насосів

	ГІН-0,5М1	ГІН-2	ГІН-5	СОНА-1	АВТО-20М
Швидкодія ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) у діапазоні $(10^{-4} - 10^{-6}) \text{Па}$	0,45	1,8	4,5	0,	4,5
Залишковий тиск, <b>Па</b>	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-10}$
Попередній тиск, <b>Па</b>	0,1	0,1	0,1	$6,6 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$
Термін праці прискорювача, <b>г</b>	1500	3000	3000	3000	1000
Запас титану, <b>кг</b>	$6 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-2}$	$10^{-1}$	$3 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-2}$
Діаметр впускного патрубків, <b>мм</b>	260	380	500	260	500

Таблиця Д.1.11.

## Характеристики магніторозрядних насосів

	НОРД-10	НОРД-25	НОРД-100	НОРД-250	ТРІОН-150
Швидкодія ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) за $6,6 \times 10^{-5}$ , <b>Па</b>	0,01	0,028	0,1	0,28	0,13
Граничний тиск, <b>Па</b>	$6,6 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-9}$
Найбільший початковий тиск, <b>Па</b>	8	8	8	8	13
Найбільший тиск стійкої роботи	0,	0,1	0,1	0,1	0,13
Діаметр впускного патрубків, <b>мм</b>	32	100	100	160	100

Таблиця Д.1.12.

## Характеристики бустерних насосів

	БН-3	БН-2000	БН-4500	БН-150000
Робочий діапазон тиску, Па	$6,6 \times 10^{-2} \dots 1$	$6,6 \times 10^{-2} \dots 1$	$6,6 \times 10^{-2} \dots 1$	$6,6 \times 10^{-2} \dots 1$
Швидкодія (м³/с) за тиском 1 Па	0,45	2,50	4,50	1,50
Залишковий тиск, Па	$6,6 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$
Діаметр впускного патрубку, мм	160	260	500	900
випускного, мм	55	100	150	260

Таблиця Д.1.13.

## Характеристики паромасляних насосів

	НВО-40	Н-0156	Н-10-Б	ЦВЛ-1006	Н-2Т-3
Робочий діапазон тисків, 1)	$7 \times 10^{-4} - 0,66$	$\times 10^{-4} - 0,26$	$2,6 \times 10^{-4} - 1$	$4 \times 10^{-4} - 0,04$	$6 \times 10^{-4} - 0,16$
Виліт масла у бік високого вакууму, мг/(год $\times$ см²) 2)	5	0,1	0,01	0,01	0,05
Швидкодія (м³/с) 3)	0,05	0,015	0,05	0,10	1,5
Граничний тиск, Па 4)	$6,6 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-6}$	$\times 10^{-4}$
Попередній тиск, Па 5)	0,3	53	40	13	40
Діаметр патрубка впускного, мм 6)	6,2	46	86	86	360
Випускного 7)	10	8	20	20	50

Продовження табл. Д 1.13

	Н-5Т-3	Н-8-ТМ	Н-20Т	Н-40
1)	$6 \times 10^{-5} - 0,6$	$6 \times 10^{-5} - 0,05$	$2 \times 10^{-4} - 0,02$	$6 \times 10^{-4} - 0,02$
2)	0,05	0,05	0,05	0,05
3)	3,0	7,5	20,0	38,0
4)	$6 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$
5)	40	40	53	40
6)	380	500	900	1200
7)	85	85	55	55

Таблиця Д.1.14.

## Характеристики плоских вакуумних засувок

	ЗВЕ-100	ЗВ7-160	ЗВЕ-250	ЗВЕ-400	ЗВЕ-630	ЗВЕ-900
Діаметр умовного проходу, мм	100	160	250	400	630	900
Провідність у молекулярному режимі, м³/с	1,2	3,34	13,4	46,25	137,2	306,36
Натікання у вакуумну порожнину, м³/с	$2,7 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Час спрацьовування, с	20	20	30	35	35	35
Об'єм, м³	0,0025	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Таблиця Д.1.15.

## Фізико-механічні характеристики гумових ущільнювачів

	7889	9624	14Р-23	ІРП-1015	ІРП-1368	ІРП-2043
Мінімальна робоча температура у вакуумі, С	- 30	- 35	- 74	- 25	- 50	- 30
Максимальна робоча температура у вакуумі, С	70	80	200	80	250	200
Температура знегаження, (за добу)	65	75	200	75	250	200
Питома швидкість газо-виділення, $\text{м}^3 \times \text{Па} / (\text{с} \times \text{м}^2)$	$5,3 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
Витрати маси, за 50 г, %	2,3	3,4	3,4	6,2	4,0	0,4

Таблиця Д.1.16.

Проникність вакуумних матеріалів ( $\varpi_i$ ) і теплота активації  $E_p$ 

Матеріали	$\text{Па}^{1/2} \times \text{м}^2/\text{с}$ для азоту	$E_p \times 10^{-3}$ , КДж/кмоль
Сталь	$4 \times 10^{-8}$	
Каучук	$1,5 \times 10^{-5}$	27,0
Гума 7889	$3,0 \times 10^{-7}$	26,0
-*- 9024	$0,9 \times 10^{-3}$	51,
ІРП-1015	$2,3 \times 10^{-4}$	49,9
ІРП-1368	$1,0 \times 10^{-8}$	8,80
Скло С-89-1	$1,3 \times 10^{-10}$	
Залізо	$3,8 \times 10^{-4}$	199

Таблиця Д.1.17.

## Модуль пружності й коефіцієнт Пуассона при 20°C

	Е, ГПа	$\alpha$
Скло	49-78	0,2 - 0,3
Целулоїд	1,7 - 1,9	0,39
Сталь легована	206	0,25 - 0,39
Дюралюміній	79	0,31
Алюміній	68 - 70	0,32 - 0,36

Таблиця Д.1.18.

## Характеристики теплових вакуумметрів

Тип вакуумметра	Найменування	Тип перетворювача	Діапазон вимірювання, Торр	Відносна похибка, %	Габарити, мм	Маса, Кг	Додаткові характеристики
ВТ-3	Вакууметр термопарний	ПМТ-2 ПМТ-4 МТ-8	5...0,001	30	320×185 ×150	4,5	
ВСБ-2	Вакууметр опору блокувальний	МТ-6	30...0,02	30		0,53	Один канал блокування Вих. на самоп. 10 мВ
ВТБ-1	Вакууметр тепловий	ПМТ-6 МТ-6Ф	30...0,002	+60 -40	200×158 ×319	6,0	Два канали блокуван. Вих. на самоп. 10 В

Таблиця Д.1.19.

## Характеристики іонізаційних вакуумметрів

Тип вакуумметра	Найменування	Тип перетворювача	Діапазон вимірювання, Торр	Віднос-на похибка, %	Габарити, мм	Маса, Кг	Додаткові характеристики
ВІТ-2	Вакууметр іонізаційний термопарний	ПМТ-2 ПМТ-4 МТ-8 ПМІ-2 ПМІ-3	5...0,001 $10^{-2}$ ... $1 \times 10^{-7}$	30	320× 280× 215	10,0	Лінійна шкала. Вих. на самоп. 10 мВ
ВІТ-3	Вакууметр іонізаційний термопарний	МТ-8 ПМІ-10	30...0,002 $10^{-2}$ ... $1 \times 10^{-5}$	35	230× 360× 485	15	Лінійна і логарифм. шкали. Вих. на самоп. 10 мВ
ВІТ-4	Вакууметр іонізаційний тепловий	ПМТ-6 ПМІ-41	30...0,002 $10^{-2}$ ... $5 \times 10^{-8}$	50 35	248× 153× 344	8,5	Лінійна і логарифм. Шкали. Вих. на самоп. 10 В



## Умовні позначення елементів вакуумних систем

Найменування	Позначення	
	графічне	текстове
1	2	3
Насос вакуумний (позначення загальне)		N
Обертовий		NL
Двороторний		NZ
Турбомолекулярний		NR
Газобаластовий		NLG
Обертовий багатоступінчастий		NS
Дифузійний		ND
Іонно – сорбційний		NE
Магніторозрядний		NM
Адсорбційний		NA
Уловлювач (позначення загальне)		B
Уловлювач, що охолоджується рідиною		BW
Уловлювач наливний		BL
Уловлювач сорбційний		BS
Манометричний перетворювач (позначення загальне)		P
Манометричний перетворювач деформаційний		PD

## Продовження Додатка 2

1	2	3
Рідинний		PL
Іонізаційний		PA
Магнітний		PM
Тепловий		PT
Визначник течій (негерметичностей)		G
Клапан (позначення загальне)		V
з ручним приводом		VH
з дистанційним керуванням		VA
з електромагнітним приводом		VE
Клапан прохідний		VR
Клапан кутовий		VN
трипрохідний		VT
Натікач		VF
Камера вакуумна		CV
Частина вакуумної камери, що прогрівається		CT
Трубопровід		T

The diagram shows a technical drawing layout with the following dimensions and text:

- Overall width: 210
- Inner frame width: 185
- Left margin: 20
- Right margin: 287
- Bottom margin: 5
- Bottom-right corner dimension: 297

**Міністерство освіти і науки України**  
**Харківська національна академія**  
**міського господарства**

(Назва роботи)  
**Розрахунок вакуумної установки для**  
**прогартування вольфрамових ниток**  
**до температури 1000 С**

**Розрахунково – графічна робота**  
**КН – 18.06 10841.91 ( номер залкової**  
**↑ книжки )**

Виконав (П. І. Б.) “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20.. р.

**Харків 20..**

## НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з курсу “Вакуумна техніка” (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” (0906 “Електротехніка”) спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”

Укладач: к. фіз.-мат. н., доц. Євген Володимирович Шепілко

Редактор: М.З. Аляб'єв

Комп'ютерна верстка Зражевська Н.В.

План 2009, поз.313 М

---

Підп. до друку 24.09.2009	Формат 60x84 1/16.	Папір офісний.
Друк на ризографі.	Обл.-вид. арк. 1,5.	Ум.-друк. арк. 1,4.
Замовл. №	Тираж 50 прим.	

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції , 12

---

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ  
61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12